

УДК 534

Применение ультразвука для повышения качества сепарирования круп

Аспирант **Н.С. Ведмеденко**, kingjulion@mail.ru

канд. воен. наук **А.Н. Пальчиков**, palchikov_anatoliy@mail.ru

канд. техн. наук **В.Т. Антуфьев**, antufjew2010@yandex.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В работе предложена и исследована технология сепарации круп в трибоэлектростатическом сепараторе с применением физических эффектов ультразвука. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили результативность данного метода. Исследовательская работа направлена на изучение изменения процесса сепарации зерновых продуктов путем подбора параметров ультразвукового излучателя, которые значительно влияют не только на равномерность истечения их из питателя при увеличении производительности, но и на величину электростатической зарядки круп, что позволяет существенно повысить эффективность трибоэлектростатического сепаратора. Применение ультразвукового питателя-бункера обеспечивает устойчивую подачу сыпучих материалов и их электростатическое разделение по фракциям с минимальными удельными энергозатратами. Приводятся результаты эксперимента, свидетельствующие о возможности применения ультразвука для повышения качества сепарирования круп.

Ключевые слова: сепарация круп; трибоэлектростатический сепаратор; ультразвук; электризация вибрацией; качество сепарирования.

Application of ultrasound to enhance the separation of cereals

PhD student **Nikita S. Vedmedenko**, kingjulion@mail.ru

Ph.D. **Anatolii N. Palchikov**, palchikov_anatoliy@mail.ru

Ph.D. **Valerii T. Antufjew**, antufjew2010@yandex.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The work proposed and studied the technology of separation of cereals in the tribo electrostatic separator with the physical effects of ultrasound. Theoretical and experimental studies have confirmed the effectiveness of this method. The research work aims to explore changes in the process of separation of grain products by adjusting the parameters of the ultrasonic transducer, which greatly affect not only the uniformity of expiration of their feeder with an increase in productivity, but also on the value of the electrostatic charging of cereals, which can significantly improve the triboelectrostatic separator. Ultrasonic hopper-feeder provides a stable supply of bulk materials and their electrostatic separation of fractions with minimal specific energy consumption. The results of the experiment, indicating the possibility of application of ultrasound to enhance the separation of grains.

Keywords: separation of grains; Tribo electrostatic separator; ultrasound; vibration electrification; the quality of separation.

Введение

Сегодня значительная часть мощностей крупяного производства основывается на оборудовании XX века, что влечет за собой технологическое отставание и невысокие качественные показатели [1]. Например, из-за несовершенства сепараторов из лузги не полностью отбирается зародыш и часть кондиционной крупы, которые остаются в отрубях и идут на корм животным или сжигаются [2]. Для улучшения технологии сепарации круп авторами предложено использовать более продуктивный метод и трибоэлектростатический сепаратор с применением физических эффектов ультразвука [3].

В отличие от большинства методов обогащения и разделения электросепарация малоэнергоёмка, не требует подачи воды, а также исключает дорогостоящую очистку сточных вод и воздуха [4,5]. Этот метод обогащения и очистки круп отличается наименьшей запыленностью воздуха за счет полной задержки пыли электрическим полем сепаратора и низким шумом процесса [6]. Положительной стороной электрической сепарации является и то, что данный процесс универсален: электрическую сепарацию можно применять как для очистки зерна, так и для сортировки продуктов его дробления, разделения отходов круп с выделением зародыша и лузги [7]. Недостатком существующих машин является низкая производительность и качество отсепарированного продукта [8, 9]. Нами предложена конструкция трибоэлектростатического камерного сепаратора с интенсификацией процесса в поле ультразвука, что решает проблему повышения качества и производительности установки [10].

Известно, что промышленные трибоэлектростатические камерные сепараторы работают по принципу зарядки частиц крупы от трения между собой и о поверхность подающего изолятора-лотка крупяной смеси под действием сил гравитации [11]. Увеличение наклона лотка и соответственно снижение времени зарядки не дают должного эффекта и лоток стараются делать завышенной ширины, чтобы поток зерна проходил в один слой [12]. Ультразвук увеличивает в сотни раз частоту касаний крупы между собой и лотком [5]. Производительность трибоэлектростатического сепаратора прочно связана с процессом контакта зерновой смеси с поверхностью лотка, где идет зарядка зерна. Этот процесс условно можно разделить на две стадии: первая — «турбулентная», когда зерновки после попадания на лоток совершают многочисленные отскоки от ленты, и вторая — «ламинарная», которая характеризуется плавным скольжением продуктов шелушения на поверхности лотка. При «ламинарной» стадии выделяются два действующих фактора, способствующих преобразованию зерновой смеси в однослойное состояние. Первый — каждая зерновка стремится занять свободное пространство под действием собственного веса, второй — ввиду разности сил трения между лотком и первым слоем зерновок, а также между первым и вторым слоем, когда возникают силы сдвига слоев относительно друг друга. Это не всегда возможно под действием только сил гравитации. Ультразвук резко увеличивает скорость скольжения зерновок друг о друга, укладку их в один слой, достаточно высокую зарядку трибоэлектричеством и качественное разделение потом по физическим свойствам в электрическом поле [12, 13].

Предмет исследования

Для исследований авторами был применен простейший камерный электростатический сепаратор свободного падения. После зарядки разделяемый материал поступает из дозатора в зону с электростатическим полем. Поле создается вертикально расположенными некоронирующими электродами. Падая вниз под действием сил тяжести, заряженные частицы лузги, дробленого и целого зерна отклоняются в сторону электродов под действием кулоновских сил.

Направление действия электрической силы зависит от знака избыточного заряда частицы. На рисунке 1 приведена схема лабораторного камерного электростатического сепаратора. Увеличение межэлектродного расстояния в нижней части сепаратора позволяет расширить веер разделяемых

материалов и таким образом улучшить их сепарацию. Преимуществом данного типа сепараторов является их бесшумность, большая производительность, так как процесс разделения частиц материала осуществляется не на поверхности электрода, а в межэлектродном пространстве, отсутствие пыли и малое потребление электроэнергии. К недостаткам данной конструкции можно отнести постепенное накапливание слоя мелких частиц в результате осаждения их на электроды. При образовании на электроде слоя пыли определенной величины он отваливается от электрода и часть отсепарированного материала попадает в непригодные хвосты, направляемые в отходы. В связи с этим электроды периодически встряхиваются электромагнитными вибраторами. Сепаратор должен иметь надежное заземление и электроблокировку.

На рисунке 1 представлена схема электростатического сепаратора с трибозарядкой продуктов шелушения в поле ультразвука. Сепаратор характеризуется следующими показателями.

Ширина сегментных электродов лабораторного сепаратора 0,4 м, высота 1,7 м. Расстояние между электродами: по верху 0,10 м, по низу до 0,2 м. Рабочее напряжение сепаратора – до 40 кВ. Крупность питания – до 2,4 мм. (просо + оболочки + пшено).

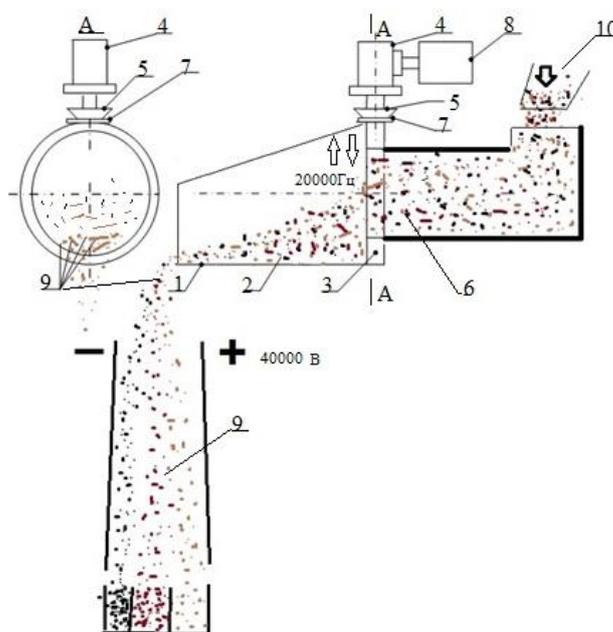


Рисунок 1 – Схема электростатического сепаратора с трибозарядкой продуктов шелушения в поле ультразвука:

1 – вибрирующий лоток (пластик); 2 – продукты обрушения (оболочка, ядро, необрушенное зерно); 3 – металлическое зажимное кольцо с хомутом для передачи вибраций корпусу точки-спуска; 4 – магнестрикционный преобразователь; 5 – ультразвуковой концентратор; 6 – питатель-бункер; 7 – фланец; 8 – ультразвуковой генератор; 9 – трибозлектростатически заряженные продукты шелушения; (- / +) – приложенное напряжение к пластинам электростатического сепаратора. Внизу – многоячейный сборник продуктов сепарирования. 10 – подача продуктов обрушения на трибозарядку.

Ультразвуковой генератор 8 представляет собой высокочастотный генератор типа «Волна-М» (модель УЗТА-1/22-ОРв) с частотой $22 \pm 0,5$ кГц; интенсивность $1,0\text{--}2,0$ Вт/см²; амплитуда колебаний от 10 до 40 мкм. В качестве магнестрикционного преобразователя 4 использована пьезоэлектрическая колебательная система (модель УЗТА-1/22-ОРв) с потребляемой мощностью до 1000 Вт [12].

Работает электростатический сепаратор следующим образом. Вибрирующий лоток из пластика, закрепленный в стальном зажимном кольце, жестко связанном с ультразвуковым концентратором, механически воздействует на продукты шелушения до подачи их в электростатическое поле

и заряжает их разным электрическим потенциалом, пропорциональным физическим свойствам частиц. В связи с этим в сепараторе происходит интенсивное разделение продуктов шелушения на фракции кулоновскими силами.

В промышленном исполнении продукты сепарации могут поступать на ленточные конвейеры или другие транспортирующие устройства. Сепаратор рассчитан на рабочее напряжение до 40 кВ. Производительность промышленных сепараторов определяется количеством и размерами объединяемых ими секций. Большая эффективность таких камерных сепараторов позволяет ограничиваться небольшим числом очистных операций. При этом очистка осуществляется при однократном пропуске исходного материала через сепаратор, состоящий из необходимого числа вертикально расположенных и последовательно соединенных между собой секций.

Методика эксперимента

Вибрацию на лоток передавали от ультразвукового концентратора с частотой 20 000 Гц. Более высокая частота вызывает большие тепловые потери ультразвука в крупе и неравномерность озвучивания ее в объеме, частоты менее 18 000 Гц недопустимы из-за большого шума в цехе [14]. Изменяя мощность, подаваемую на излучатель, мы изменяли амплитуду колебаний от 10 мкм до 40 мкм, что было достаточно для интенсивного псевдооживления продуктов шелушения. Угол наклона лотка к горизонту устанавливался так, чтобы самостоятельно продукты шелушения двигались в нем в один слой, то есть угол откоса был практически равен углу наклона лотка. Этот угол изменяли при смене сорта обрушиваемых зерен. В зависимости от амплитуды перпендикулярного перемещения (вибрирования) лотка (0–40 мкм) толщина потока крупы регулировалась от одного слоя до 3–4 слоев целых ядер вперемешку с дробленкой и оболочкой. Количественную и визуальную информацию о процессе получали измерением производительности сепаратора и фотографированием. В качестве материалов для электризации использовали продукты обрушивания проса и пшеницы. Амплитуда колебаний и время опыта задавалась вручную или через компьютерную программу СОМ [15]. Эти параметры замерялись автоматически и высвечивались на табло генератора ультразвука. Потребляемая мощность ультразвуковым генератором и высоковольтным источником напряжения считывалась с измерительного комплекса КА-50 и лабораторного миллиамперметра.

Производительность сепаратора по крупе в зависимости от амплитуды вибратора определяли путем взвешивания на лабораторных весах навески, полученной за время опыта, и соответствующего вычисления. Результаты опытов представлены в виде зависимости, описывающей производительность сепаратора по пшенице (рисунок 2).

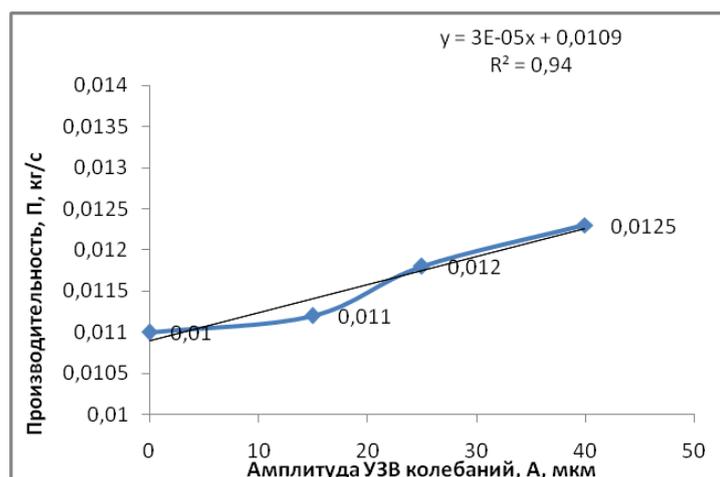


Рисунок 2 – Зависимость производительности электростатического сепаратора круп от амплитуды колебаний УЗВ излучателя

Это позволяет быстро выбрать амплитуду вибрации в зависимости от требуемой производительности и качества крупы на выходе (рисунок 3). Следует заметить, что амплитуда до 10 мкм практически не влияет на увеличение потока продуктов шелушения по спуску и производительность электросепаратора, и резко изменяется уже при амплитуде 15 мкм. При этом начинается активная фаза псевдооживления смеси, снижается трение между частицами и смесь приобретает дополнительную текучесть.

График на рисунке 3 показывает, что качество крупы с увеличением амплитуды сначала растет вместе с ростом производительности (в отсепарированной крупе примеси уменьшаются), а затем снова растут. Незначительное снижение качества на максимальных амплитудах требует дополнительных исследований. Возможно перегружается сам сепаратор или изменяется степень зарядки частиц при бурном псевдооживлении. К сожалению, характеристики ультразвукового излучателя не позволили расширить диапазон амплитуд в большую сторону.

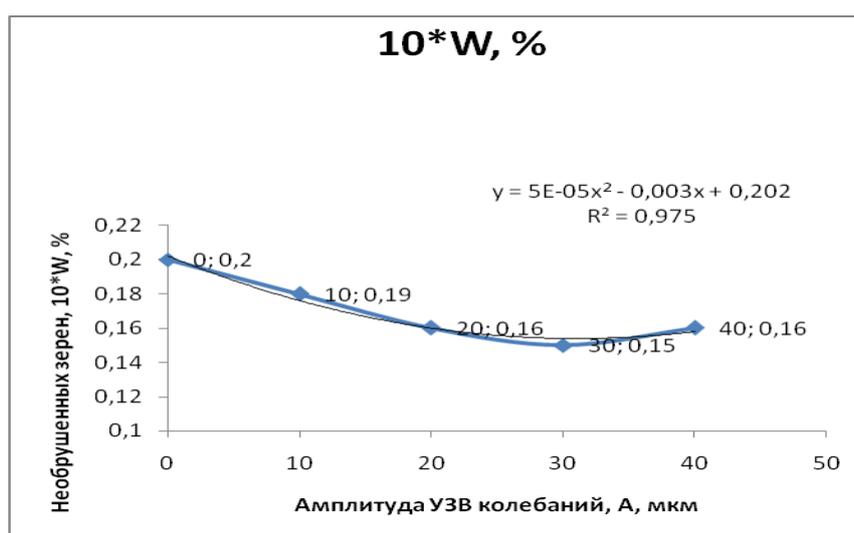


Рисунок 3 – Зависимость количества необрушенных зерен в крупе пшено высшего сорта при сепарировании круп электростатическим сепаратором от амплитуды колебаний УЗВ излучателя

Таким образом, учитывая некоторую пологость выведенных кривых на обоих графиках, можно заключить, что рабочий диапазон амплитуды от 30 до 35 мкм легко выдержать в реальном трибоэлектростатическом сепараторе при увеличении производительности существующих промышленных машин на 20–22 процента.

Литература:

1. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции: учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2009. 448 с.
2. Данин В.Б., Пастухов А.С. Механизм естественного усыхания хлебобулочных изделий. Борьба с потерей массы продукта // Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 1. С.1–8.
3. Бородин И., Шмигель В. Электричество на очистке и сепарации семян // Сельский механизатор. 1997. № 10. С.20–22.
4. Бородин И. Ф. Диэлектрические сепараторы семян // Сельский механизатор. 1997. № 9. С. 18–19.
5. Воронкин П.А. Влияние ультразвукового воздействия на скорость трогания сыпучих материалов // Хранение и переработка зерна. 2009. № 7. С. 39–40.
6. Епищенко А. С. Оценка эффективности работы зерновых сепараторов различных типов // Сборник трудов II Международной НПК «Актуальные проблемы сельскохозяйственной науки и образования». Самара: СамВен, 2005. С. 310–313.

7. Казаков Ю.Р. Возможные пути совершенствования питателей для высокоточного дозирования сыпучих зерновых продуктов // Вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. СПб., 2014. № 4. С. 19–20.
8. Верболоз Е.И., Пальчиков А.Н., Антуфьев В.Т. Исследование разбухания макаронных прядей в процессе прессования в поле ультразвука // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 15–17.
9. Антуфьев В.Т., Демченко В.А., Казаков Ю.Р. Экспериментальный стенд питателя для оценки воздействия ультразвуковых колебаний на процесс истечения круп // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 2. С. 155–161.
10. Казаков Ю.Р., Демченко В.А. Пути повышения точности работы дозаторов для сыпучих пищевых продуктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. №1. С. 161.
11. Тарушкин В. И. Основные электротехнические характеристики диэлектрических сепараторов семян // Труды IV научно-творческой конференции (Москва, 12–13 мая 2004 г), Москва. №2. С. 87–88.
12. Хмельёв В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: монография. Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1997. 160 с.
13. Громцев С.А., Громцев А.С., Червяков О.М. Особенности производства ржано-пшеничного хлеба в полевых условиях // Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 3. С. 14.
14. Иванова М.А. Разработка ресурсосберегающего процесса выпечки мелкоштучных булочных изделий с наложением поля ультразвука: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2012. С.16.
15. Косой В.Д., Виноградов Я.И., Малышев А.Д. Инженерная реология биотехнологических сред: учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2005. 648 с.

References

1. Aret V.A., Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva syr'ya i gotovoi produktsii: uchebnoe posobie*. [Physical and mechanical properties of raw materials and finished products]. Tutorial. St. Petersburg, GIORД Publ., 2009, 448 p.
2. Danin V.B., Pastukhov A.S. Mekhanizm estestvennogo usykhaniya khlebobulochnykh izdelii. Bor'ba s poterei massy produkta [Mechanism of a natural drying of bakery products. Fight against loss of mass of a product]. *Processes and Equipment for food production*. 2009, no. 1, pp. 1–8.
3. Borodin I., Shmigel' V. Elektrichestvo na ochildke i separatsii semyan [Electricity for cleaning and separation of seeds]. *Sel'skii mekhanizator* [Rural mechanic]. 1997, no. 10, pp. 20–22.
4. Borodin I. F. Dielektricheskie separatory semyan [Dielectric separators of seeds]. *Sel'skii mekhanizator* [Rural mechanic]. 1997, no. 9, pp. 18–19.
5. Voronkin P.A. Vliyanie ul'trazvukovogo vozdeistviya na skorost' trovaniya sypuchikh materialov [Effect of ultrasound exposure on velocity acceleration bulk material]. *Khranenie i pererabotka zerna* [Storage and processing of grain]. 2009, no. 7, pp. 39–40.
6. Epishchenko A. S. Otsenka effektivnosti raboty zernovykh separatorov razlichnykh tipov [Evaluation of the effectiveness of the different types of grain separators]. *Sbornik trudov II Mezhdunarodnoi NPK «Aktual'nye problemy sel'skokhozyaistvennoi nauki i obrazovaniya»* [Actual problems of agricultural science and education]. Samara, SamVen Publ., 2005, pp. 310–313.
7. Kazakov Yu.R. Vozmozhnye puti sovershenstvovaniya pitatelei dlya vysokotochnogo dozirovaniya sypuchikh zernovykh produktov [Possible ways to improve feeders for high-precision dispensing of bulk grain products]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of St. Petersburg State Agrarian University]. St. Petersburg, 2014, no. 4, pp. 19–20.
8. Verboloz E.I., Pal'chikov A.N., Antuf'ev V.T. Issledovanie razbukhaniya makaronnykh pryadei v protsesse pressovaniya v pole ul'trazvuka [Research of swelling of macaroni locks in the course of pressing in the field of ultrasound]. *Scientific journal NRU ITMO, series Processes and Equipment for food production*. 2014, no. 2, pp. 15–17.
9. Antuf'ev V.T., Demchenko V.A., Kazakov Yu.R. Eksperimental'nyi stend pitatelya dlya otsenki vozdeistviya ul'trazvukovykh kolebaniy na protsess istecheniya krup [Experimental stand of feeder for assess the impact of ultrasonic oscillations on process the expiry of cereals]. *Scientific journal NRU ITMO, series Processes and Equipment for food production*. 2015, no. 2, pp. 155–161.

10. Kazakov Yu.R., Demchenko V.A. Puti povysheniya tochnosti raboty dozatorov dlya sypuchikh pishchevykh produktov [Ways to increase the accuracy of dispensers for bulk foodstuffs]. *Scientific journal NRU ITMO, series Processes and Equipment for food production*. 2015, no. 1, p. 161.
11. Tarushkin V. I. Osnovnye elektrotekhnicheskie kharakteristiki dielektricheskikh separatorov semyan [The main electrical characteristics of dielectric seed separators]. *Trudy IV nauchno-tvorcheskoi konferentsii [Works IV of scientific and creative conference (Moscow, 12–13 may 2004)]*, Moscow, 2004, no. 2, pp. 87–88 .
12. Khmelev V.N., Popova O.V. *Mnogofunktsional'nye ul'trazvukovye apparaty i ikh primeneniye v usloviyakh malykh proizvodstv, sel'skom i domashnem khozyaistve* [Multipurpose ultrasonic devices and their application in the conditions of small productions, rural and a household]. Barnaul, AltGTU Publ., 1997. 160 p.
13. Gromtsev S.A., Gromtsev A.S., Chervyakov O.M. Osobennosti proizvodstva rzhano-pshenichnogo khleba v polevykh usloviyakh [Specifics production of rye-wheat bread in field conditions]. *Scientific journal NRU ITMO, series Processes and Equipment for food production*. 2013, no. 3, p. 14.
14. Ivanova M.A. Razrabotka resursosberegayushchego protsessa vypechki melkoshtuchnykh bulochnykh izdelii s nalozheniem polya ul'trazvuka [Development of resource-saving process to baking of small-piece of bakery products with the imposition of the field of ultrasound]. *Extended abstract of candidate's thesis*. St. Petersburg, 2012, p. 16.
15. Kosoi V.D., Vinogradov Ya.I., Malyshev A.D. *Inzhenernaya reologiya biotekhnologicheskikh sred* [Engineering rheology biotech environments]. Tutorial. St. Petersburg, GIORD Publ., 2005, 648 p.

Статья поступила в редакцию 05.10.15